

## ANALISA PENGARUH SUHU AWAL PELAT PANAS PADA PROSES *QUENCHING* CELAH SEMPIT REKTANGULAR

M. Hadi Kusuma<sup>1</sup>, Mulya Juarsa<sup>1,2</sup>, Anhar Riza Antariksawan<sup>3</sup>, Nandy Putra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia

<sup>3</sup>Penelitian Dasar dan Terapan, Badan Tenaga Nuklir Nasional

Email: luluikal@batan.go.id

Diterima editor 12 Mei 2012

Disetujui untuk publikasi 04 Juni 2012

### ABSTRAK

**ANALISA PENGARUH SUHU AWAL PELAT PANAS PADA PROSES *QUENCHING* CELAH SEMPIT REKTANGULAR.** Pemahaman terhadap manajemen termal apabila terjadi suatu kecelakaan parah reaktor nuklir seperti melelehnya bahan bakar dan teras reaktor, menjadi prioritas utama untuk menjaga integritas bejana tekan reaktor. Dengan demikian hasil lelehan bahan bakar dan teras reaktor (debris) tidak keluar dari bejana tekan reaktor dan mengakibatkan dampak lain yang lebih besar ke lingkungan. Salah satu cara yang dilakukan untuk menjaga integritas bejana tekan reaktor adalah dengan melakukan pendinginan terhadap panas berlebih yang dihasilkan akibat dari kecelakaan tersebut. Untuk mempelajari dan mendapatkan pemahaman mengenai hal tersebut, maka dilakukan penelitian mengenai pengaruh suhu awal pelat panas dalam proses *quenching* (pendinginan secara tiba-tiba) celah sempit rektangular. Penelitian difokuskan pada penentuan suhu *rewetting* dari pendinginan pelat panas dengan suhu awal pelat 220 °C, 400 °C, dan 600 °C dengan laju aliran air pendingin 0,2 liter/detik. Eksperimen dilakukan dengan menginjektikan air pada laju aliran 0,2 liter/detik pada suhu air pendingin 85 °C ke dalam celah sempit rektangular. Data hasil pengukuran digunakan untuk mengetahui suhu *rewetting* yang terjadi pada pendinginan pelat panas tersebut. Tujuannya adalah untuk memahami pengaruh suhu awal pelat panas terhadap *rewetting* pada proses *quenching* di celah sempit rektangular. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa titik *rewetting* pada pendinginan pelat panas 220 °C, 400 °C, dan 600 °C terjadi pada suhu *rewetting* yang berbeda-beda. Pada suhu awal pelat panas 220 °C, suhu *rewetting* terjadi pada 220 °C yaitu langsung ketika air dilewatkan melalui celah sempit rektangular. Pada suhu awal pelat panas 400 °C, suhu *rewetting* terjadi pada 379,51 °C. Dan pada suhu awal pelat panas 600 °C, suhu *rewetting* terjadi pada 426,63 °C. Perbedaan suhu awal pelat panas yang sangat signifikan menyebabkan terjadinya perubahan sifat fisik benda uji, berbedanya rejim pendidihan yang dialami oleh fluida yang melewati celah sempit, perubahan nilai kalor spesifik bahan, perubahan nilai konduktifitas termal, dan perbedaan suhu *wall superheated*-nya. Perubahan-perubahan yang terjadi tersebut menyebabkan peningkatan suhu *rewetting* seiring dengan kenaikan suhu awal pelat panas.

Kata kunci: *rewetting*, *quenching*, celah sempit, keselamatan nuklir

### ABSTRACT

**AN ANALYSIS OF HOT PLATE INITIAL TEMPERATURE EFFECT ON RECTANGULAR NARROW GAP *QUENCHING* PROCESS.** The understanding about thermal management in the event of a severe accident such as the melting nuclear reactor fuel and reactor core, became a priority to maintain the integrity of reactor pressure vessel. Thus the debris will not out from the reactor pressure vessel and resulting impact of more substantial to the environment. One way to maintain the integrity of the reactor pressure vessel was cooling of the excess heat generated due to the accident. To get understanding of this aspect, the research focused on the effect of the initial temperature of the hot plate in the rectangular narrow gap quenching process. The initial temperature effect on quenching process is related to cooling process (thermal management) when the occurrence of a nuclear accident due to loss of coolant accident or severe accident. In order to address the problem, it is crucial to conduct research to get a better understanding of thermal management regarding to nuclear cooling accident. The research focused on determining the rewetting temperature of hot plate cooling on 220 °C, 400 °C, and 600 °C with 0.2 liters/sec cooling water flowrate. Experiments were carried out by injecting 85 °C cooling water temperature into the narrow gap at flowrates of 0.2 liters/sec. Data of transient temperature measurements were recorded using a data acquisition system in order to know the rewetting temperature during the quenching process. This study aims to understand the effect of hot plate initial temperature on rewetting during rectangular narrow gap quenching process. The results obtained show that the rewetting point on cooling the hot plate 220 °C, 400

*°C and 600 °C occurs at varying rewetting temperatures. At 220 °C hot plate initial temperature, the rewetting temperature occurs on 220 °C. At 400 °C hot plate initial temperature, the rewetting temperature occurs on 379.51 °C. At 600 °C hot plate initial temperature, the rewetting temperature occurs on 426.63 °C. Significant differences of hot plate initial temperature leads to changes in physical properties of material, different boiling regimes occurs when fluid passing through a narrow gap, changes on specific heat of material, changes on thermal conductivity of material, and the differences of wall superheated temperature. Rewetting temperature will increase due to increasing on hot plate initial temperature.*

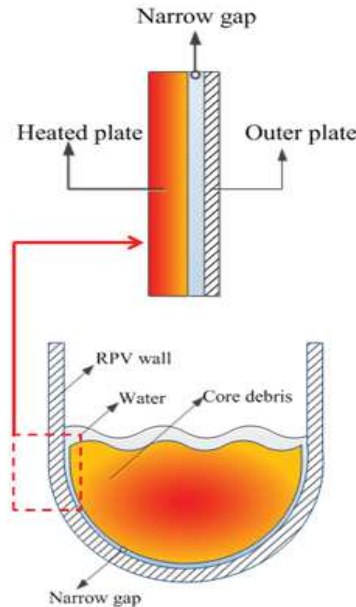
*Keywords: rewetting, quenching, narrow gap, nuclear safety*

## PENDAHULUAN

Kecelakaan parah (*severe accident*) yang terjadi pada reaktor Three Mile Island-2 (TMI-2) mengakibatkan bahan bakar dan teras meleleh akibat *overheated*. Lelehan bahan bakar dan teras (*debris*) kemudian tertumpuk di bagian bawah bejana tekan reaktor. Debris tersebut tidak menyentuh dinding dalam bejana tekan reaktor karena terdapat air pendingin yang digunakan untuk mendinginkan permukaan lelehan, sehingga terbentuk celah sempit berukuran rata-rata 1 mm diantara keduanya. Air pendingin dapat memasuki celah sempit tersebut dan mendinginkan permukaan lelehan. Proses pendinginan yang terjadi di dalam celah sempit inilah yang menjaga integritas bejana tekan reaktor tetap utuh. Proses pendinginan yang terjadi di celah sempit ini disebut dengan *quenching*, yaitu pendinginan mendadak suatu permukaan panas yang terjadi saat permukaan tersebut terendam dalam zat cair. Penetrasi air ke dalam celah sempit selain akibat gravitasi akan banyak ditentukan oleh karakteristik perpindahan panas dalam celah sempit tersebut.

Fenomena yang terjadi pada kasus di atas menjadi temuan yang sangat berharga untuk mempelajari proses pendinginan yang terjadi pada kecelakaan tersebut dan mempelajari manajemen termal yang akan dilakukan apabila kecelakaan serupa berulang pada operasi reaktor berikutnya. Dengan mengetahui manajemen termal yang baik, diharapkan dapat mengurangi dampak yang ditimbulkan apabila kecelakaan tersebut kembali terjadi.

Banyak penelitian yang dilakukan mengenai proses pendinginan dan fenomena perpindahan panas yang terjadi pada kecelakaan TMI-2. Hasil-hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa celah sempit yang terdapat di antara lelehan teras yang bagian luarnya membeku dengan dinding bejana tekan reaktor berukuran sekitar 1 – 2 mm. Celah ini terbentuk karena pengaruh air pendingin yang menahan debris tidak menyentuh dinding bejana tekan bagian dalam akibat gaya *bouyance* [1-3]. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi kondisi lelehan teras di bagian bawah bejana reaktor yang membentuk celah sempit diantara lelehan teras dan dinding bejana reaktor.



Gambar 1. Konfigurasi keadaan *debris* pada bagian bawah *Reactor Pressure Vessel*

Hasil penelitian lainnya menunjukkan dalam fenomena perpindahan panas di celah sempit vertikal rektangular bahwa pada celah sempit berukuran  $< 3$  mm terdapat uap yang menutupi permukaan pemanas. Gelembung uap yang terbentuk bergerak ke atas, sedangkan air mengalir sepanjang dinding dingin ke bawah. Adanya uap tersebut mencegah kontak antara air dengan permukaan pemanas. Uap terbentuk pada rejim didih film, yaitu daerah dimana permukaan suatu bidang yang panas tidak bersentuhan dengan air, hanya tertutupi oleh uap yang berbatasan dengan air. Perpindahan kalor selama pendinginan celah secara signifikan dibatasi oleh *counter current flow limitation* dalam celah sempit. Terjadinya *counter current flow limitation* menyebabkan panas yang terserap oleh air pendingin akan sangat sedikit, sehingga *critical heat flux* tidak akan tercapai dan pendinginan akan menjadi sangat lambat. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi terbentuknya *counter current flow limitation* adalah kecepatan *superficial* fluida pendingin dan sifat fisik dari material permukaan panas. Apabila kecepatan *superficial* air pendingin lebih lambat dari pada kecepatan *superficial* uap, maka air pendingin akan tertahan dan sangat sulit untuk menembus perlawanan yang dilakukan oleh uap. Seiring dengan hilangnya *counter current flow limitation*, maka fluks kalor kritis akan mudah tercapai. Fluks kalor kritis akan naik seiring meningkatnya *mass flow velocity*. Pada kondisi suhu awal yang sama dan ukuran celahnya besar, maka *rewetting* pada dinding bagian dalam akan lebih cepat terjadi pada fluks kalor yang lebih tinggi dan fluks kalor kritis juga tinggi. Bentuk aliran fluida tidak bergantung pada ukuran celahnya, tetapi bergantung pada proses pemanasannya. Kecepatan fluida yang mengalir dalam celah sempit, kondisi fluida (*subcooling*), sifat fluida, dan ukuran celah sempit memiliki pengaruh yang signifikan dalam karakteristik perpindahan kalor, performansi pendinginan, dan transisi pola aliran [4-7].

Dari banyak penelitian yang telah dilakukan tersebut, masih menunjukkan adanya beberapa parameter yang sedikit sekali diamati. Salah satunya adalah pengaruh suhu awal pelat panas pada proses *quenching* dengan variasi suhu awal pelat pada debit air pendingin tertentu. Untuk itu, maka perlu dilakukan analisa mengenai pengaruh suhu awal pelat panas pada proses *quenching* celah sempit rektangular dengan variasi suhu awal pelat pada debit air pendingin tertentu. Tujuannya adalah mempelajari pengaruh suhu awal pelat panas pada proses *quenching* celah sempit rektangular dan memahami fenomena yang terjadi di dalamnya. Pemahaman ini sangat dibutuhkan untuk manajemen pengendalian termal ketika terjadi kecelakaan reaktor khususnya yang diakibatkan oleh kehilangan air pendingin (LOCA, *loss of coolant accident*) maupun *severe accident*. Metodologi yang digunakan

dalam penelitian ini adalah melakukan *literature survey* dari penelitian tentang pengaruh suhu awal pelat panas pada proses *quenching* celah sempit rektangular yang pernah dilakukan, melakukan eksperimen untuk memperoleh data pada celah sempit rektangular dengan parameter suhu awal pelat dan debit aliran air pendingin, menentukan laju penurunan suhu pelat panas, melakukan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh dan menarik kesimpulan dari hasil analisa yang dilakukan.

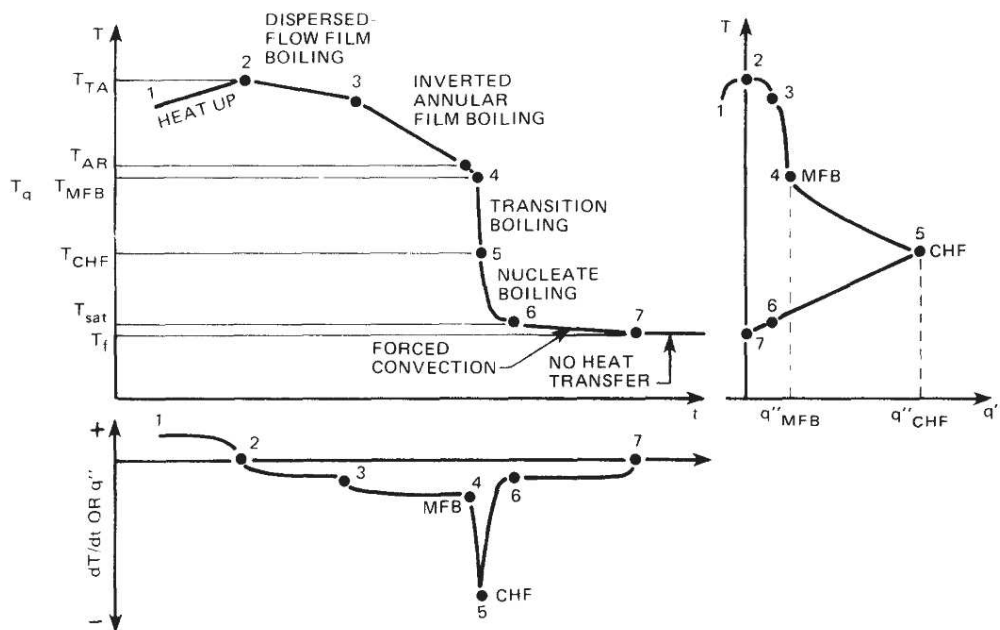
## TEORI

### Kontak Fluida Dengan Benda Bersuhu Tinggi

Kontak antara fluida dengan benda bersuhu tinggi secara terus menerus merupakan sesuatu yang diharapkan dalam pendinginan suatu permukaan benda yang sangat panas. Secara umum dapat dikatakan bahwa kontak stabil secara terus menerus itu disebut dengan *rewetting*. Secara lebih dalam, definisi *rewetting* adalah *re-establishment* dari kontak fluida dengan permukaan yang panas dan menyebabkannya dapat basah. Permukaan yang sangat panas tersebut tidak dapat terbasahi oleh air ketika suhu permukaan benda panas tersebut masih berada pada rejim pendidihan *film*-nya. Proses *rewetting* terjadi ketika suhu permukaan berada di bawah titik *Leidenfrost*, yaitu titik terjadinya pendidihan *film* yang sangat minim. Pada saat rejim pendidihannya telah berada di bawah titik *Leidenfrost*, maka ketika air dialirkan akan terjadi kontak antara air dengan permukaan benda panas secara *establish* dan mengakibatkan permukaan benda panas tersebut dapat basah. Pada proses *rewetting* koefisien perpindahan kalor memiliki nilai yang paling tinggi dan fluks kalor kritis akan meningkat seiring dengan meningkatnya laju aliran massa [8].

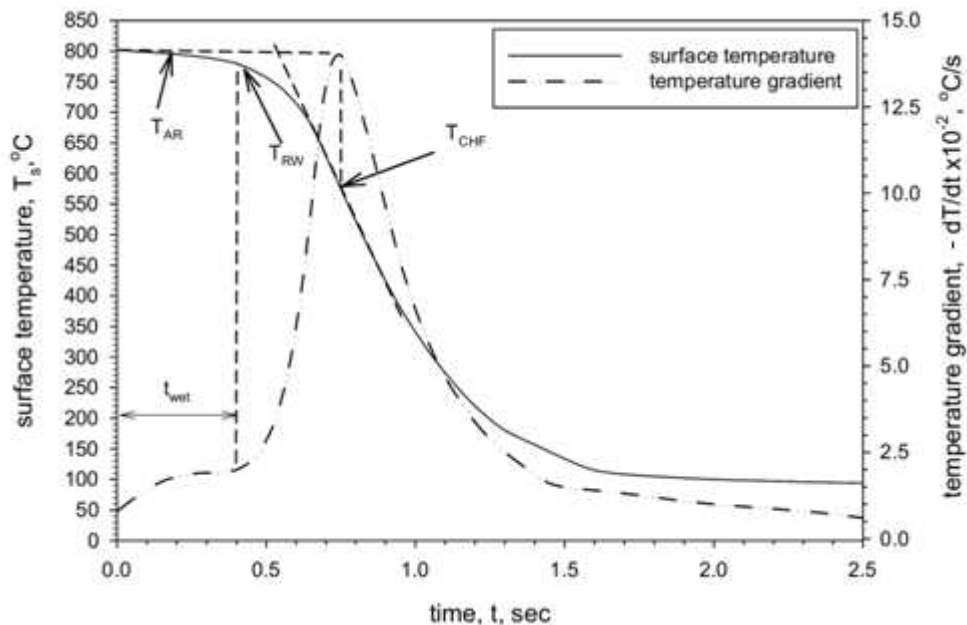
*Rewetting* hanya terjadi ketika dilakukan pendinginan suatu permukaan yang sangat panas dimana terdapat kondisi uap film yang terbentuk antara permukaan dengan *layer* fluida di atas permukaan tersebut. Fenomena turunnya suhu secara drastis disebut dengan *rewetting*. Pada saat terjadi *rewetting*, suhu fluida pendingin cukup rendah untuk mengkondensasikan gelembung uap sehingga akhirnya membasahi permukaan yang panas dan kemudian suhu permukaan turun secara drastis. Rejim perpindahan kalor berubah dari pendidihan *film* ke pendidihan transisi dan pendidihan inti. Pendinginan yang efektif terjadi setelah permukaan panas tersebut berada di bawah suhu *rewetting*. Pada kondisi *rewetting*, fluida dapat melalui lapisan uap permukaan panas dan terjadi kontak yang *re-establish* dengan permukaan panas yang kering dan akhirnya menuju rejim perpindahan kalor konveksi paksa kondisi *steady state* [9-12].

*Carbajo* dalam investigasinya tentang suhu *rewetting* menggambarkan pembagian daerah pendinginan ketika terjadi *rewetting* pada kelongsong bahan bakar menjadi *dispersed flow film boiling*, *inverted annular film boiling*, *transition boiling*, *nucleate boiling*, *force convection*, dan *no heat transfer* seperti tampak pada Gambar 2 [13].



Gambar 2. Kurva transien suhu kelongsong bahan bakar pada saat dilakukan bottom reflooding dengan laju aliran air yang tinggi [13]

Agrawal *et. al* melakukan penelitian tentang efek diameter *jet* terhadap *rewetting* dari permukaan horizontal panas selama *quenching* menggunakan *stainless steel* dengan ketebalan 0,25 mm dan suhu awal permukaan 800 °C. Permukaan panas tersebut didinginkan oleh *water jet* dengan suhu 22 °C. Hasilnya menunjukkan bahwa *suhu rewetting*, waktu tunda *wetting*, dan kecepatan *rewetting* menentukan kinerja dari suatu pendinginan permukaan panas [14]. Gambar 3 merupakan kurva suhu permukaan dan gradiennya pada pendinginan transien yang didapatkan dari penelitiannya.



Gambar 3. Kurva suhu permukaan dan gradiennya pada pendinginan transien [14]

Kim *et.al* melakukan studi tentang korelasi empirik suhu *rewetting* menggunakan analisis dimensional pada *vertical circular channel* dengan kondisi *bottow flooding*. Dari korelasi tersebut



terlihat bahwa suhu *rewetting* akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu pelat panas [15]. Korelasi yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$T_q = 19.51 \times T_{ws} \times \left( \frac{T_{sc}}{T_{ws}} \right)^{0.107} \times \left( \frac{c_p \cdot G \cdot \delta}{T_{ws}} \right)^{-0.162} \times \left( \frac{k \rho^2 T_{ws}}{\delta \cdot G^3} \right)^{-0.0989} \times \left( \frac{z}{\delta} \right)^{-0.163} \quad (1)$$

dengan:

$T_q$  = Suhu *rewetting*, K

$T_s$  = Suhu saturasi fluida, K

$T_{ws}$  = Suhu *wall superheated* = selisih antara suhu dinding dan suhu saturasi fluida, K

$T_{sc}$  = Selisih antara suhu saturasi fluida terhadap suhu *coolant*, K

$c_p$  = Kalor spesifik bahan pipa, J/kgK

$G$  = Laju aliran massa, kg/m<sup>2</sup>s

$\Delta$  = Ketebalan dinding pipa, m

$K$  = Konduktifitas termal tabung uji, W/m.K

$P$  = Densitas massa bahan pipa, kg/m<sup>3</sup>

$Z$  = Jarak *axial* dari *inlet*, m

## METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metodologi eksperimental dengan langkah-langkah sebagai berikut:

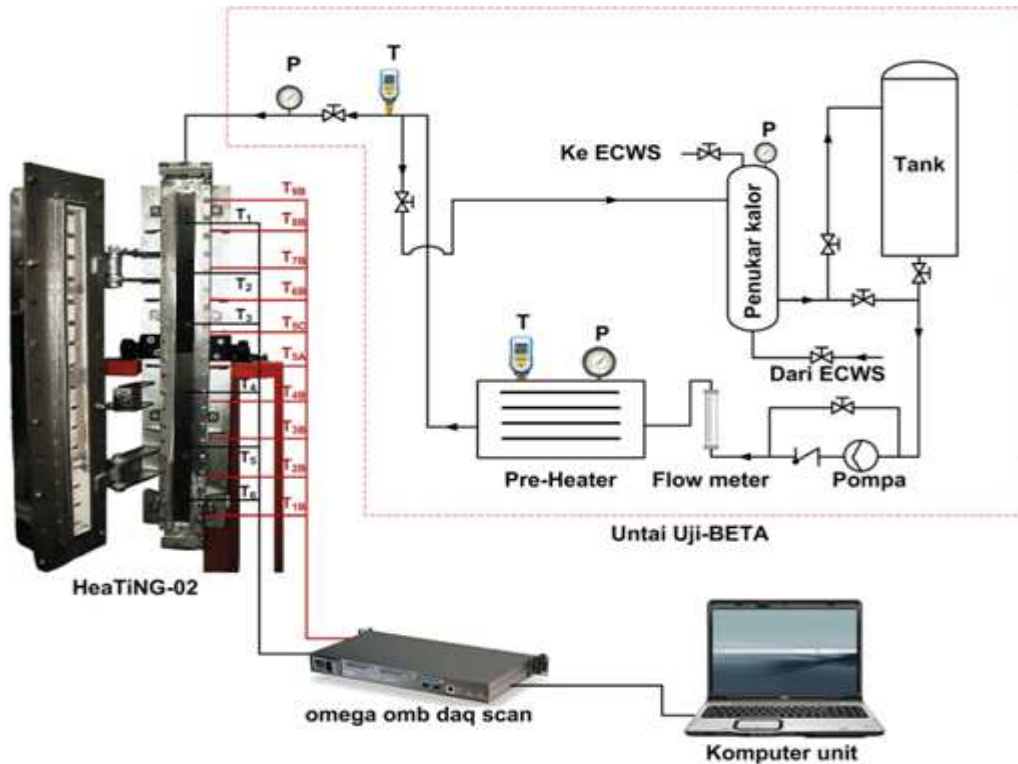
1. Melakukan *literature survey* dari penelitian tentang pengaruh suhu awal pelat panas terhadap *rewetting* pada proses *quenching* celah sempit rektanguler yang pernah dilakukan
2. Melakukan eksperimen untuk memperoleh data pada celah sempit rektanguler dengan parameter suhu awal pelat dan debit aliran air pendingin
3. Menentukan laju penurunan suhu pelat panas
4. Melakukan pembahasan terhadap hasil yang telah diperoleh
5. Menarik kesimpulan dari hasil analisa yang dilakukan.

## Skema Pengujian

Dalam penelitian ini digunakan metode eksperimental. Eksperimen yang dilakukan untuk mengetahui fenomena *rewetting* pada celah sempit rektanguler selama proses *quenching* menggunakan *loop* terbuka. Gambar 4 memperlihatkan skematik pengujian yang dilakukan pada eksperimen ini. *Loop* terdiri dari bagian uji yang berupa dua buah pelat *stainless steel* 316 sejajar (pelat penutup dan pelat utama) sehingga antara keduanya akan membentuk celah sempit. Pelat penutup merupakan pelat yang dipanaskan dengan *heater* yang dihubungkan dengan *slide regulator voltage* dengan daya maksimal 25 kW. Kalor yang dihasilkan oleh *heater* dipindahkan secara radiasi ke pelat penutup. Kalor yang diterima oleh pelat penutup bagian atas secara konveksi akan mengalir ke bagian bawahnya. Kemudian kalor tersebut dipindahkan secara radiasi ke pelat utama. Setelah pelat utama mencapai suhu yang diinginkan, kemudian aliran listrik ke *heater* dimatikan.

Peralatan uji celah sempit rektanguler (HeaTiNG-02) dihubungkan dengan *loop* air pendingin (untai uji BETA). Untai uji BETA mensirkulasikan air pendingin ke dan dapat menjaga suhu air tetap berada pada suhu yang diinginkan. Air pendingin kemudian dialirkan ke dalam HeaTiNG-02. Dalam eksperimen ini air masukan yang dialirkan memiliki suhu 85 °C. Air disirkulasikan dengan pompa ke dalam HeaTiNG-02. Apabila air yang terdapat pada untai uji BETA habis, maka air yang ada di dalam tangki (terbuka terhadap udara luar) secara otomatis akan mengalir ke dalam untai uji BETA tersebut untuk kemudian dipanaskan kembali oleh *preheater* dan dialirkan lagi ke dalam HeaTiNG-02.

Pengambilan dan perekaman data hasil eksperimen dilakukan ketika semua aliran listrik menuju HeaTiNG-02 dimatikan. Data suhu selama proses pemanasan pelat direkam dengan menggunakan data akuisisi sistem yang dihubungkan dengan komputer. Sebelum dilakukan proses *quenching*, kamera *infra-red* digunakan untuk mengetahui distribusi suhu di *heater* dan pelat penutup. Pada proses *quenching*, perekaman data suhu terus dilakukan dan dihentikan setelah suhu pelat utama mencapai suhu yang sama dengan suhu masukan air pendingin.



Gambar 4. Skematik pengujian HeaTing-02

### Prosedur Eksperimen

Prosedur eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaturan lebar celah sempit.  
Pengaturan lebar celah sempit dilakukan dengan memberikan lapisan *graf foil* yang diletakkan antara pelat utama dengan pelat penutup pada alat HeaTiNG-2. *Graf foil* yang digunakan memiliki ketebalan 0,5 mm dan memiliki ketahanan hingga suhu 3000 °C. Selain berfungsi untuk mengatur lebar celah sempit, juga berfungsi untuk menahan air yang akan dilewatkan agar tidak bocor melewati sisi-sisi bagian uji.
2. Pengaturan suhu dan laju alir air pendingin.  
Alat uji HeaTiNG-02 digabungkan dengan untai uji BETA. Untai uji BETA berfungsi sebagai *loop* aliran air pendingin. Air pendingin yang akan dilewatkan melalui celah sempit harus diatur suhu dan laju alirnya. Suhu air pendingin diatur dengan menggunakan *preheater*. *Preheater* dapat mengatur dan mempertahankan suhu air pendingin yang akan dimasukkan ke dalam celah sempit. Air di dalam sistem pendingin mulai dipanaskan oleh *preheater* hingga mencapai suhu 85 °C. Sedangkan laju aliran air pendingin diatur dengan menggunakan pompa primer. Pompa primer dihidupkan dengan frekuensi tertentu agar debit air pendingin sesuai dengan yang diinginkan. Pembacaan suhu dan laju aliran air pendingin ini menggunakan alat ukur digital yang terpasang pada untai uji BETA.
3. Pemanasan pelat rektangular.

Pemanasan alat uji HeaTiNG-02 dilakukan secara radiasi oleh keramik *heater* secara horizontal dengan daya total 15000 Watt. Pengaturan masukan tegangan selama pemanasan menggunakan *Slide regulator voltage* dengan daya maksimal 25000 Watt. Tegangan dinaikkan secara bertahap agar distribusi kalor dapat merata pada bidang yang dipanaskan. Satu tahapan kenaikan tegangan dilakukan hingga suhu pelat mencapai kondisi *steady*, kemudian tegangan akan terus dinaikkan hingga mencapai suhu yang diinginkan. Setelah suhu pelat rectangular yang diinginkan tercapai, kemudian suplai listrik ke *heater* dimatikan.

4. Pembukaan penutup keramik *heater*.  
Pembukaan penutup keramik *heater* dilakukan secara vertikal setelah suplai listrik yang diberikan pada *heater* dimatikan.
5. Perekaman gambar dengan kamera *infra-red*.  
Perekaman ini bertujuan untuk memastikan distribusi suhu yang terdapat pada *heater* dan pelat penutup.
6. Pendinginan pelat rectangular  
Pendinginan dilakukan dengan memasukkan air pendingin yang telah diatur suhu dan laju alirnya dengan menggunakan untai uji BETA. Pendinginan dilakukan dari bagian atas menuju bagian bawah celah sempit pelat rectangular. Kran penutup air pendingin dibuka dan air mulai dialirkan ke dalam celah sempit. Pendinginan dimulai pada saat dibukanya penutup keramik *heater* dan berakhir pada saat suhu pelat rectangular berada di bawah suhu air pendingin yang dimasukkan.
7. Perekaman data suhu.  
Perekaman data suhu selama pemanasan dan proses *quenching* pelat rectangular dilakukan dengan menggunakan sistem akuisisi data yang dihubungkan dengan komputer.
8. Menghitung laju pendinginan.  
Laju pendinginan diperoleh dengan menghitung gradient penurunan suhu pelat terhadap waktu, sehingga laju pendinginan  $= -\frac{dT}{dt}$  (°C/detik).

### Variabel Eksperimen

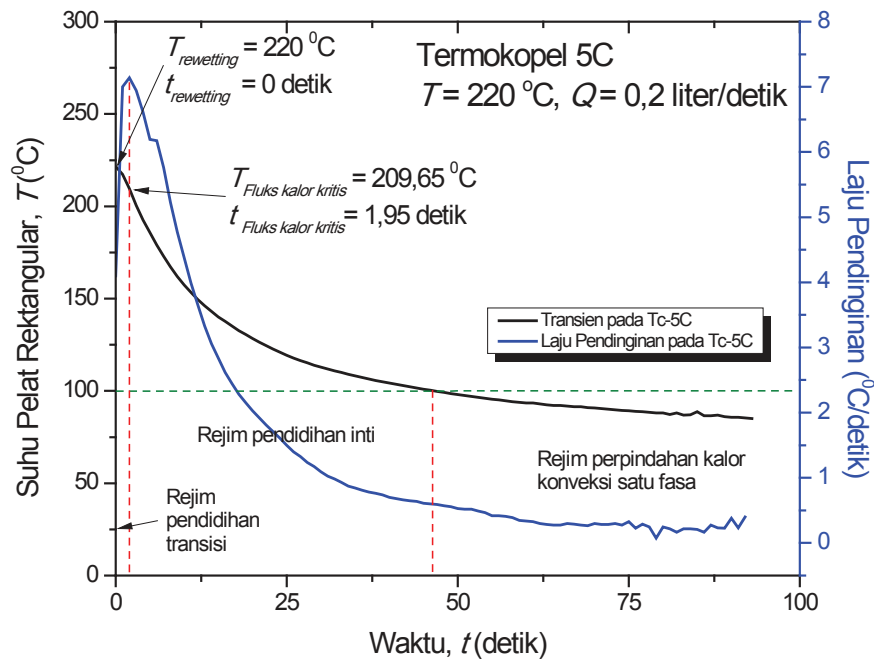
Variabel yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- $T_{initial\ pelat} = 220\ ^\circ\text{C}$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit  $85\ ^\circ\text{C}$ , ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik.
- $T_{initial\ pelat} = 400\ ^\circ\text{C}$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit  $85\ ^\circ\text{C}$ , ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik.
- $T_{initial\ pelat} = 600\ ^\circ\text{C}$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit  $85\ ^\circ\text{C}$ , ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik
- Data pengukuran yang digunakan dalam eksperimen ini adalah data suhu yang terekam pada termokopel 5C saja. Data suhu pada termokopel 5C adalah data tertinggi dan dijadikan ukuran penghentian kalor yang diberikan oleh *heater* ke pelat rectangular ketika pembacaan suhu mencapai  $220\ ^\circ\text{C}$ ,  $400\ ^\circ\text{C}$  dan  $600\ ^\circ\text{C}$ . Sementara pada saat yang sama, pembacaan suhu di termokopel lain menunjukkan angka di bawah  $200\ ^\circ\text{C}$ ,  $400\ ^\circ\text{C}$  dan  $600\ ^\circ\text{C}$ .

### HASIL DAN PEMBAHASAN

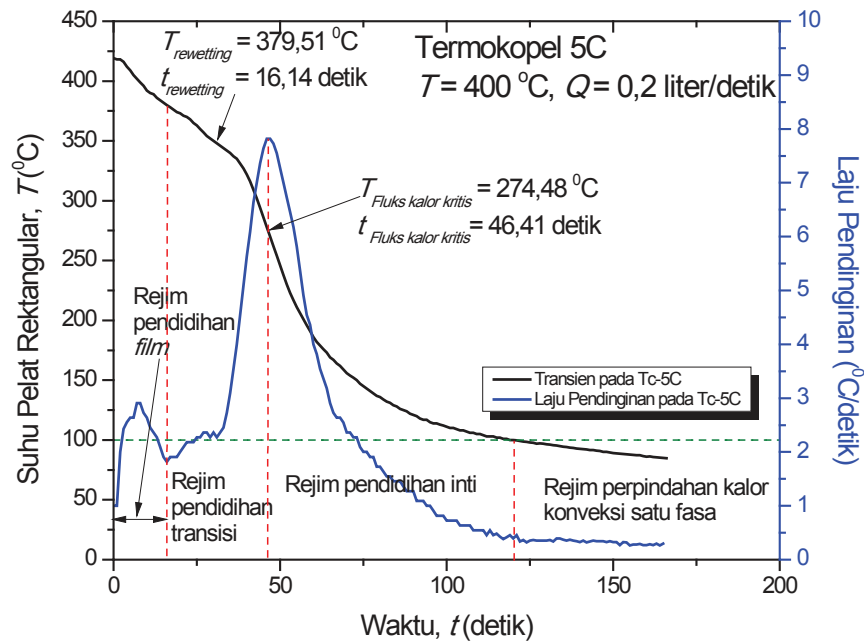
Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat panas  $220\ ^\circ\text{C}$ ,  $400\ ^\circ\text{C}$ , dan  $600\ ^\circ\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik dapat dilihat pada Gambar 5-7.





Gambar 5. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat rektangular 220 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik

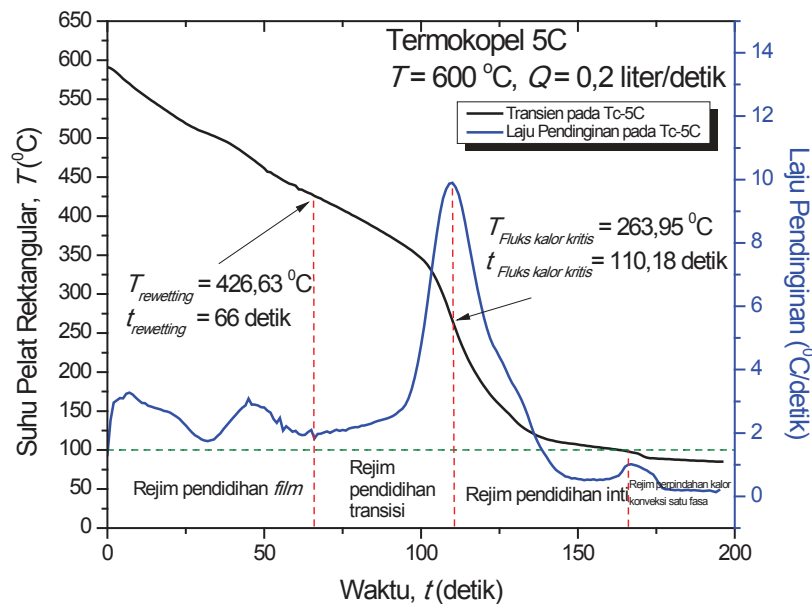
Dari kurva laju pendinginan pada suhu 220 °C pada debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik, secara umum dapat dilihat bahwa rewetting langsung terjadi ketika air pendingin mulai dialirkan ke dalam celah sempit rektangular dan menyentuh pelat panas pada titik pengukuran 5C. Tidak terjadi pendidihan film pada suhu permukaan pelat rektangular 220 °C. Air pendingin langsung membasahi pelat panas secara establish setelah dialirkan ke dalam celah sempit rektangular, yang menunjukkan bahwa suhu kondisi ini berada di bawah rejim pendidihan film minimal (titik Leidenfrost). Mengalirnya air pendingin secara establish menunjukkan bahwa fluks kalor yang terdapat di pelat panas banyak terserap oleh air pendingin dan tercapainya fluks kalor kritis setelah rejim pendidihan transisi terlampaui. Fluks kalor kritis tercapai ketika pelat rektangular berada pada suhu 209,65 °C. Setelah fluks kalor kritis tercapai rejim pendidihan berubah menuju rejim pendidihan inti, dan akhirnya memasuki rejim perpindahan kalor satu fasa konveksi hingga suhu pendinginan yang diinginkan tercapai.



Gambar 6. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat rektangular 400 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik

Dapat dilihat dari kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat panas 400 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik terlihat bahwa terjadi semua fenomena pendidihan ketika air pendingin dilewatkan ke dalam celah sempit rektangular dan menyentuh pelat panas pada titik pengukuran 5C, yaitu rejim pendidihan film, rejim pendidihan transisi, rejim pendidihan inti, dan rejim perpindahan kalor konveksi satu fasa. Pada rejim pendidihan *film*, air pendingin tidak dapat membasahi pelat panas. Air pendingin akan menjadi uap ketika menyentuh pelat panas pada rejim ini. Tidak terjadi penyerapan kalor yang besar pada pendidihan *film* ini, yang berarti bahwa penurunan suhu tidak terlalu signifikan ketika air menyentuh pelat panas. Semakin lama, kondisi pendidihan *film* akan hilang seiring dengan terus terjadinya kontak dengan air pendingin. Hilangnya rejim pendidihan *film* menyebabkan terjadinya perubahan rejim pendidihan ke rejim pendidihan transisi. Pada saat titik *Leidenfrost* tercapai, yang berarti kondisi *film* sangat minim, air pendingin yang melewati celah sempit rektangular mulai dapat menyentuh permukaan pelat panas secara *establish*. Kondisi inilah yang disebut dengan titik *rewetting*. Titik *rewetting* terjadi pada saat pelat panas berada pada kondisi pendidihan *film* minimal. Hal ini ditandai dengan terjadinya penyerapan kalor pelat panas yang semakin besar oleh air pendingin.

Pada kurva laju pendinginan terlihat mulai terjadinya penurunan suhu yang signifikan karena banyaknya kalor yang terserap oleh air. Kalor yang terserap akan mencapai puncaknya pada kondisi fluks kalor kritis. Fluks kalor kritis tercapai ketika pelat rektangular berada pada suhu 274,48 °C. Pada kondisi ini terjadi penyerapan kalor yang paling besar oleh air pendingin yang melewati pelat panas. Kondisi ini berlangsung terus secara *establish* hingga tercapainya rejim pendidihan inti dan rejim perpindahan kalor satu fasa konveksi. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan pelat panas akan cepat tercapai ketika kondisi pendidihan *film* minimal terlampaui. Pada kondisi ini air pendingin dapat secara *establish* melakukan pendinginan pelat panas hingga suhu pendinginan yang diinginkan tercapai.



Gambar 7. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat rektangular 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik

Dapat dilihat dari kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat panas 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik memiliki fenomena pendidihan yang serupa dengan pendinginan pada suhu awal pelat panas 400 °C. Terlihat bahwa terjadi semua fenomena pendidihan ketika air pendingin dilewatkan ke dalam celah sempit rektangular dan menyentuh pelat panas pada titik pengukuran 5C, yaitu rejim pendidihan *film*, rejim pendidihan transisi, rejim pendidihan inti, dan rejim perpindahan kalor konveksi satu fasa. Pada rejim pendidihan *film*, air pendingin tidak dapat membasahi pelat panas. Air pendingin akan menjadi uap ketika menyentuh pelat panas pada rejim ini. Tidak terjadi penyerapan kalor yang besar pada pendidihan *film* ini, yang berarti bahwa penurunan suhu tidak terlalu signifikan ketika air menyentuh pelat panas. Semakin lama, kondisi pendidihan *film* akan hilang seiring dengan terus terjadinya kontak dengan air pendingin. Hilangnya rejim pendidihan *film* menyebabkan terjadinya perubahan rejim pendidihan ke rejim pendidihan transisi. Pada saat titik *Leidenfrost* tercapai, yang berarti kondisi *film* sangat minim, air pendingin yang melewati celah sempit rektangular mulai dapat menyentuh permukaan pelat panas secara *establish*. Kondisi inilah yang disebut dengan titik *rewetting*. Titik *rewetting* terjadi pada saat pelat panas berada pada kondisi pendidihan *film* minimal. Hal ini ditandai dengan terjadinya penyerapan kalor pelat panas yang semakin besar oleh air pendingin. Pada kurva laju pendinginan terlihat mulai terjadinya penurunan suhu yang signifikan karena banyaknya kalor yang terserap oleh air. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa selama *quenching* pada permukaan suatu pelat rektangular yang bersuhu tinggi (di atas suhu saturasi air pendinginnya), pelat tidak akan dapat langsung dibasahi oleh air pendingin. Ketika air akan menyentuh permukaan pelat terjadi penguapan sehingga permukaannya tetap kering. Kemudian terjadi kontak antara air dengan permukaan pelat secara terus menerus sehingga mengakibatkan pelat panas mengalami penurunan suhu dan pada saat tertentu air akhirnya dapat membasahi permukaan pelat.

Kalor yang terserap akan mencapai puncaknya pada kondisi fluks kalor kritis. Fluks kalor kritis tercapai ketika pelat rektangular berada pada suhu 263,95 °C. Pada kondisi ini terjadi penyerapan kalor yang paling besar oleh air pendingin yang melewati pelat panas. Kondisi ini berlangsung terus secara *establish* hingga tercapainya rejim pendidihan inti dan rejim perpindahan kalor satu fasa konveksi. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan pelat panas akan cepat tercapai ketika kondisi pendidihan *film*

minimal terlampaui. Pada kondisi ini air pendingin dapat secara *establish* melakukan pendinginan pelat panas hingga suhu pendinginan yang diinginkan tercapai.

Dengan kurva laju pendinginan dapat diketahui pembagian rejim pendidihan diketahui suhu dan waktu mulai terjadinya *rewetting*, dan diketahui letak fluks kalor kritis yang terjadi selama proses pendinginan pelat panas. Sehingga dari kurva tersebut didapatkan bahwa suhu *rewetting* pada 220 °C, 400 °C, dan 600 °C memiliki angka yang berbeda. Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu *rewetting* terjadi seiring dengan kenaikan suhu permukaan pelat panas. Hal ini terjadi karena pelat dipanaskan pada tiga kondisi suhu yang berbeda sangat signifikan. Perbedaan suhu yang signifikan ini menyebabkan terjadinya perubahan nilai kalor spesifik dan termal konduktifitas pelat yang digunakan sebagai benda uji. Perbedaan suhu yang tinggi juga menyebabkan berbedanya nilai suhu *wall superheat*, yaitu selisih dari suhu dinding panas terhadap suhu saturasi fluidanya, dan berubahnya sifat fisik pelat uji serta berbedanya rejim pendidihan yang dialami oleh fluida yang melewati celah sempit tersebut. Fenomena yang didapatkan ini memperkuat korelasi yang didapatkan oleh Kim *et.al*.

## KESIMPULAN

Titik *rewetting* pada pendinginan pelat panas 220 °C, 400 °C, dan 600 °C terjadi pada suhu *rewetting* yang berbeda-beda. Pada suhu awal pelat panas 220 °C, suhu *rewetting* terjadi pada 220 °C yaitu langsung ketika air dilewatkan melalui celah sempit rectangular. Pada suhu awal pelat panas 400 °C, suhu *rewetting* terjadi pada 379,51 °C. Dan pada suhu awal pelat panas 600 °C, suhu *rewetting* terjadi pada 426,63 °C. Perbedaan suhu awal pelat panas yang sangat signifikan menyebabkan terjadinya perubahan sifat fisik benda uji, berbedanya rejim pendidihan yang dialami oleh fluida yang melewati celah sempit, perubahan nilai kalor spesifik bahan, perubahan nilai konduktifitas termal, dan perbedaan suhu *wall superheated*-nya. Perubahan-perubahan yang terjadi tersebut menyebabkan peningkatan suhu *rewetting* seiring dengan kenaikan suhu awal pelat panas.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Y. Maruyama et al. Application of CAMP Code to analysis of debris coolability experiments in ALPHA program. Proceeding of the Workshop on Severe Accident Research (SARJ-98); 1999. JAERI-Conf 99-005.
2. A.R. Antariksawan. Analisis degradasi teras PWR pada kejadian kehilangan catu daya. Jurnal Tri Dasa Mega. 2005, Vol. 2, No. 3.
3. D.X. Du, W.X. Tian, G.H. Su, S.Z. Qiu, Y.P. Huang, X. Yan. Theoretical study on the characteristics of critical heat flux in vertical narrow rectangular channels. Journal of Applied Thermal Engineering. 2012; 36: 21-31.
4. S. Al Issa, R. Macian. A Review of CCFL Phenomenon. Journal of Annals of Nuclear Energy. 2011; 38: 1795-1819.
5. Y.W. Wu, G.H. Su, S.Z. Qiu, B.X. Hu. Experimental study on critical heat flux in bilaterally heated annuli. International Journal of Multiphase Flow. 2009; 35: 977-986.
6. M. Juarsa. Study on boiling heat transfer under transient cooling in an annulus with a narrow gap. Master Degree Thesis of Fundamental Energy Science. Kyoto University, 2003.
7. Jian Zhang, Futoshi Tanaka, Mulya Juarsa, Kaichiro Mishima. Calculation of boiling curves during rewetting of a hot vertical narrow channel. The 10<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10). October 5-9, 2003. Seoul, Korea.

8. A.K. Saxena, V. Venkat Raj, and V. Govardhana Rao. Experimental studies on rewetting of hot vertical annular channel. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. 2001; 208: 283-303.
9. Michitsugu Mori, and Yukihiya Yabushita. Visualization of quench-rewetting phenomena of liquid-film falling during dryout and rewetting on fuel rods in high temperature and pressure BWR operating conditions. *Journal of The Visualization Society of Japan*. 2012; 139-144 DOI 10.1007/s12650-011-0115-9.
10. Nitin Karwa, Tatiana Gambaryan-Roisman, Peter Stephan, Cam Tropea. A Hydrodynamic model for subcooled liquid jet impingement at the leidenfrost condition. *Journal of Thermal Sciences*. 2011; 50: 993-1000.
11. Md. Ashraful Islam, Masanori Monde, Peter Lloyd Woodfield, Yuichi Mitsutake. Jet impingement quenching phenomena for hot surfaces well above the limiting temperature for solid-liquid contact. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008; 51: 1226-1237.
12. Nitin Karwa, Tatiana Gambaryan-Roisman, Peter Stephan, Cameron Tropea. Experimental investigation of circular free-surface jet impingement quenching: Transient Hydrodynamics and Heat Transfer. *International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011; 35: 1435-1443.
13. Juan J. Carbajo. A Studi on The rewetting temperature. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. 1985; 84: 21-52.
14. C. Agrawal, R. Kumar, A. Gupta, B. Chatterjee. Effect of jet diameter on the rewetting of hot horizontal surfaces during quenching. *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*. Accepted 22 March 2012.
15. A.K. Kim and Y. Lee. A correlation of rewetting temperature. *Letters in Heat and Mass Transfer*. 1979; 6: 117-123.